

해상용 가스터빈의 스플리터 소음기 성능에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on Acoustic Performance of Splitter Silencers in Large Maritime Gas Turbine Engines

백성현*. 이강희**. 강경식**. 이일재†
Seonghyeon Baek, Kanghee Lee, Kyungsik Kang and Iljae Lee

(Received May 19, 2015 ; Revised June 22, 2015 ; Accepted June 22, 2015)

Key Words : Dissipative Silencers(흡음형 소음기), Insertion Loss(삽입손실), Splitter Silencers(스플리터형 소음기)

ABSTRACT

Based on ISO 7235, an experimental setup to measure the acoustic performance of splitter type dissipative silencers was fabricated. The length of each duct, sound source, microphone locations, modal filter, and anechoic termination were considered in the design of this setup. The modal filter is a particularly important factor because it affects the limit of measurement. The effects of number of splitters, absorptive material density, perforate plate, and media on the noise reduction of the sample silencers were experimentally investigated. The experimental results show that the insertion loss of a silencer with media, high perforate opening, and higher number of splitters increases especially at higher frequencies.

1. 서 론

해상플랜트와 군함 등은 높은 출력을 필요로 하기 때문에 주로 가스터빈엔진을 장착하고 있다. 이러한 엔진은 높은 소음을 발생하며 해상의 협소한 공간에 장착되기 때문에 근무환경에 부정적인 영향을 미치기 쉽다. 집중력의 저하뿐만 아니라 청각의 손상을 초래할 수 있고, 특히 군함에서는 승조원간의 의사소통에 방해가 되며 적에게 함정의 위치가 노출될 위험성이 높아진다.

해상용 가스터빈에서 발생하는 소음은 흡기계와 배기계를 통해서 외부로 전달되기 때문에 이 경로에 소음을 저감할 수 있는 소음기를 장착한다. 배기계에서는 고온과 고압의 배기가스 때문에 높은 소음저

감을 필요로 한다. 흡기계를 통해서 전달되는 소음은 상대적으로 낮지만 해수의 유입과 동절기 결빙으로 인한 문제점 등을 고려해야 하기 때문에 Fig. 1과 같이 소음기는 전체 흡기 시스템과 연계하여 설계되어야 한다. 또한 소음기에 의한 압력손실이 엔진의 성능을 저하시키기 때문에 이를 고려하여야 한다.

가스터빈에서 발생하는 소음은 엔진의 높은 회전수와 많은 수의 블레이드 때문에 고주파수의 특성을 보이고 있다. 또한 흡입구의 단면적이 크기 때문에 흡입구의 단면적과 소음기의 단면적의 비율에 따라서 소음저감 성능이 결정되는 반사형 소음기를 사용하기 어렵다. 따라서 흡음재를 사용한 스플리터 형태의 소음기가 주로 사용되고 있다.

스플리터 소음기는 건물의 공조시스템이나 산업용 플랜트의 흡기에 주로 사용되는데, 흡음재를 사용

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University

E-mail : leejj@jbnu.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University

** Sungshin Enstec

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

하여 음향에너지를 열에너지로 소산하여 소음을 저감하기 때문에 흡음재의 음향학적 특성이 중요하다. 또한 스플리터의 두께와 간격에 따라서 소음저감 주파수와 크기가 결정된다. 유동에 의한 흡음재의 탈락을 방지하고 외부의 이물질로부터 흡음재를 보호하기 위하여 일반적으로 천공판을 사용하며 어떤 경우에는 흡음재와 천공판 사이에 부직포와 같은 미디어를 사용하기도 한다. Fig. 2와 같이 스플리터 소음기는 유동에 의한 저항 즉 압력손실을 줄이고 유동소음의 발생을 방지하기 위하여 유동이 들어오는 부분은 반구형으로 만들고 유동이 나가는 부분은 테이퍼로 구성된다.

스플리터 소음기의 성능에 대한 연구⁽¹⁻⁸⁾에는 실험적인 방법과 수치해석적 방법이 적용되고 있다. 대형 스플리터 소음기에 대한 측정장치의 제작 및 성능평가^(4,5)에 어려움이 있다. 또한 단면적이 커지면서 음파의 고차모드가 저주파수에서부터 전달되기 때문에 3차원의 수치적 방법⁽⁶⁻⁸⁾을 사용하는데, 대형 소음기에 대하여 고주파수에서 정확한 예측을 위해서는 요소(element)의 개수가 급격히 증가하여 많은 연산시간을 필요로 한다. 또한 천공과 미디어의 효과에 대한 정확한 예측에는 한계를 가지고 있다.

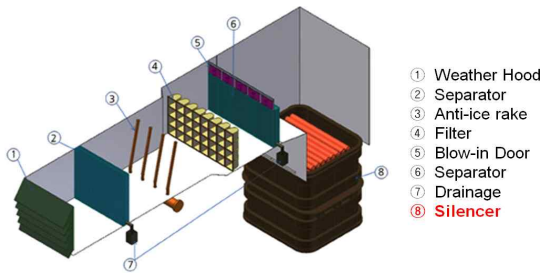


Fig. 1 Schematic of an intake system

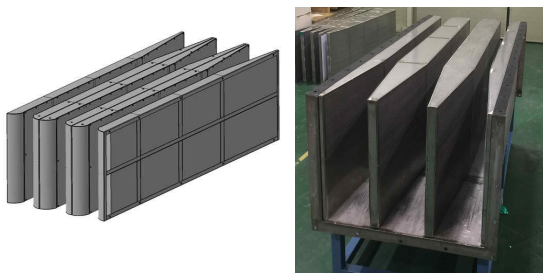


Fig. 2 Schematic and picture of a dissipative splitter silencer

이 연구는 ISO 7235⁽⁹⁾에서 제시한 방법에 기초하여 대형 스플리터형 소음기 성능 측정장비 제작과정을 간략하게 설명하고, 이 장비를 사용하여 다양한 설계인자가 소음기의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 파악하고자 한다.

2. 삽입손실 측정 장비

ISO 7235를 기준하여 Fig. 3과 같이 유동이 존재하지 않는 상태에서 무반사단을 사용하여 삽입손실을 측정하는 장비를 제작하였다⁽⁵⁾. 이 장비는 크게 음의 발생, 모달덕트, 소음기 혹은 대체덕트, 음압측정을 위한 테스트 덕트, 무반사단 등으로 구성되어 있다. 삽입손실의 측정은 대체 덕트를 설치하고 측정된 음압과 소음기를 설치하고 측정된 음압의 차이를 계산하여 결정한다. 소음기의 상류에서 110 dB 이상의 음압이 입력되도록 300 W 출력을 갖는 스피커 두 개를 설치하고 앰프의 출력을 조절하였다. 삽입손실은 고차모드의 존재로 위치에 따라서 음압이 달라지는 것을 고려하여 소음기의 하류부에 위치한 테스트 덕트에 설치된 5개의 마이크로폰에서 측정된 값을 평균하여 계산한다⁽⁹⁾. 유동이 존재하지 않기 때문에 끝단 조건으로 무반사단을 사용하였다. 실험장치의 각 덕트의 최소 길이는 최소 관심주파수인 63 Hz를 기준으로 제한되며, 이를 만족하기 위하여 장치의 전체 길이는 약 15 m로 제작되었다⁽⁵⁾.

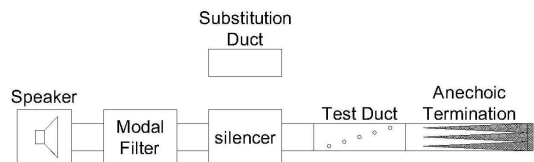


Fig. 3 Schematic and picture of an experimental setup

ISO 7235는 모달필터(modal filter)를 설치하는 것을 규정하고 있는데, “모달필터는 cut-off frequency 보다 낮은 주파수 영역에서는 3 dB 이상, 그 보다 높은 주파수에서는 5 dB 이상의 축방향 음압저감 성능을 가지고 있어야 한다”고 제시하고 있다. 이 모달필터는 스피커와 상단덕트 사이에 위치하여 스피커에서 발생하는 고차모드의 전달을 억제하기 위하여 설치된다⁽³⁾. 이러한 음압의 저감을 구현하기는 어렵지 않지만, 모달필터에서 과도한 저감은 측정대상에 입사하는 신호의 크기를 저하시키기 때문에 실험장치의 측정한계를 낮추는 부정적인 효과를 초래한다⁽⁵⁾.

스피커에서 발생한 소리는 대부분 덕트 내부의 소음기를 통과하지만 일부분은 덕트의 벽을 따라서 혹은 외부의 공기를 통해서 마이크로폰으로 전달될 수 있다. 이러한 우회경로를 통한 전달은 스피커의 성능 및 압소음의 정도와 함께 삽입손실의 측정한계를 결정한다. 덕트의 벽을 통해서 외부로 전달된 소리가 우회경로를 통해서 마이크로폰으로 전달되는 것을 줄이기 위해서 18 mm 두께의 MDF(media density fiberboard)로 덕트를 제작하였고, 덕트의 안쪽 면에는 4 mm 두께의 차음시트와 3 mm 두께의 철판을 부착하였다. 또한 덕트의 벽을 따라서 마이크로폰으로 전달되는 소리를 줄이기 위하여 덕트의 모든 연결부에 10 mm 두께의 방진고무를 사용하였으며, 그 측정한계의 실험적 결과는 Baek et al.⁽⁵⁾에 의해 제시되어 있다.

3. 실험 결과

3.1 옥타브분석과 주파수분석 비교

일반적으로 가스터빈 엔진에 사용되는 스플리터형 소음기의 단면적은 상당히 크기 때문에, 소음기의 일부분을 제작하여 실험을 하게 된다. ISO 7235에서는 소음기의 어떠한 부분을 제작하는 것이 타당한지 제시하고 있으며, 이 연구에서도 이를 따라서 현재 해상용 가스터빈에 사용되고 있는 소음기에 대하여 Fig. 2와 같은 형태의 샘플을 제작하였다. 샘플 #1의 단면은 Fig. 4와 같이 900×700 mm이고, 내부에는 폭 100 mm의 공기통로가 3개 있으며, 흡음재의 전체 폭의 합은 600 mm로 전체 단면적의 3분의 2를 차지하고 있다. 흡음재는 유동 등 외부의 충격으로부터 보호하기 위해서 미디어(부직포)로 감싸여

져 있고, 천공률이 35 %인 천공판에 의해서 고정되어 있다. 샘플 소음기의 전체 길이는 2.5 m이다.

Fig. 5는 실험장치의 측정한계와 Fig. 4에 제시된 샘플 #1 소음기에 대한 삽입손실에 대하여 옥타브밴드와 16 Hz 간격의 주파수영역 실험결과를 비교하여 보여주고 있다. ISO 7235에서는 삽입손실의 평가에 있어서 옥타브밴드를 사용할 것을 권장하고 있고, 실제 현장에서도 옥타브밴드를 사용하여 소음저감 성능을 평가하고 있다. 옥타브밴드를 기준으로 샘플 #1의 삽입손실은 500 Hz와 1 kHz에서 측정한계와 비슷한 값을 보여주고 있다. 이 측정값은 실제 소음기의 삽입손실이라기 보다는 실험장비의 한계값일 가능성이 높다.

Kirby et al.의 연구에서도 측정한계가 60 dB로 나타났으며 예측결과와 실험결과와의 차이가 측정한계가 원인이라는 설명을 제시하였다⁽³⁾. 따라서 이 두

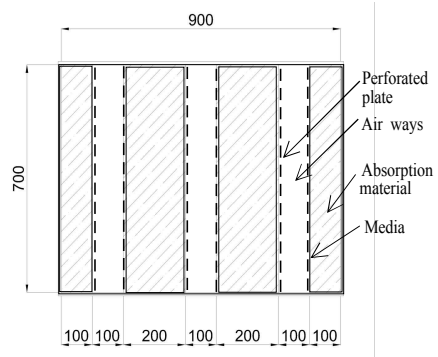


Fig. 4 Dimension of the sample #1 with 3 air ways (unit: mm)

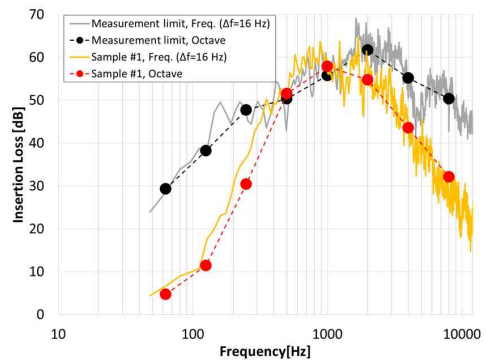


Fig. 5 Measured insertion loss of sample #1 and the limit of the experimental setup

중심주파수에서 실제에서는 더 높은 삽입손실을 가지고 있을 가능성이 높다. 2 kHz를 중심으로 하는 옥타브밴드에서는 측정한계(61.7 dB)보다 낮은 값(54.7 dB)을 보이고 있지만 주파수분석에서는 이 밴드에서도 부분적으로 측정한계에 이르거나 비슷한 값을 보이고 있다. 따라서 실제는 측정값보다 더 높은 삽입손실을 가지고 있을 수 있다. 반면에 4 kHz와 8 kHz를 중심으로 하는 영역은 거의 모두 측정한계보다 낮은 값을 가지고 있기 때문에 실제 소음저감 성능을 잘 보여주고 있다고 할 수 있다. 결론적으로 실험장비의 측정한계와 측정된 삽입손실을 비교하여 평가해야 하는데, 소음저감 성능이 높은 소음기의 삽입손실 측정 시 일반적으로 사용되는 옥타브밴드에 추가하여 주파수분석 결과를 참고할 필요가 있다.

3.2 설계인자가 삽입손실에 미치는 영향

(1) 스플리터의 개수와 폭

흡음재로 채워진 스플리터의 개수와 폭의 크기는 소음기의 성능을 결정하는 중요한 설계인자이다. 일반적으로 스플리터의 개수가 많고 폭이 넓어지면 소음저감에는 유리하겠지만, 공기의 통로가 좁아지기 때문에 스플리터의 개수와 폭을 동시에 증가하기는 어렵다. 소음기를 통과하는 공기의 양은 가스터빈 엔진에서 요구하는 성능에 따라서 결정되기 때문에 전체 단면에서 공기가 지나가는 면적은 이 요구에 의해서 결정된다고 할 수 있다. 따라서 공기통로 면적을 일정하게 유지하기 위해서는 스플리터의 개수가 늘어나면 폭은 줄어들고 반대로 개수가 줄어들면 폭은 넓어지게 된다. 이러한 스플리터의 개수와 폭의 변화가 소음기의 성능에 미치는 영향을 파악하고자 Fig. 6과 같이 두 개의 샘플을 추가로 제작하였다. 샘플 #1~#3은 동일한 양의 흡음재를 사용하였고, 동일한 공기통로의 면적을 가지고 있다. 하지만 각 스플리터의 간격과 두께는 서로 다르게 하였다.

Fig. 7은 샘플 #1~#3의 삽입손실 측정결과를 보여주고 있다. 샘플 #1과 비교하여 샘플 #3은 거의 모든 주파수 영역에서 비슷한 소음저감 성능을 보이고 있다. 하지만 4 kHz 이상의 고주파수에서는 샘플 #3이 더 높은 삽입손실을 보여주고 있는데, 8 kHz를 중심으로 하는 옥타브에서 샘플 #1은 32.1 dB가 측정된 반면에 샘플 #3은 40.7 dB로 측정되어 옥타브

밴드에서 그 차이가 더 크게 나타난다. 반면에 샘플 #2는 샘플 #1과 비교하여 2 kHz까지는 조금 낮은 소음저감 성능을 보이고 있지만, 그 보다 높은 주파수에서는 급격한 성능 저감을 보이고 있다. 특이한 것은 샘플 #2도 1 kHz 주위에서 측정한계에 이른 것으로 보인다. 따라서 스플리터의 개수를 늘리면 고주파수에서는 소음저감 성능이 상승하지만 저주파수에서는 상대적으로 작은 차이를 보인다. 같은 양의 흡음재에 대하여 스플리터의 수가 증가하면 접촉면적이 증가하여 소음저감 성능이 높아진다⁽¹⁰⁾는 설명과 유사한 실험결과를 보여주고 있지만 그 정도는 주파수의 영역에 따라서 달라진다는 것을 알 수 있다.

(2) 흡음재의 밀도

이 연구의 대상이 되는 가스터빈 엔진에 사용되는 스플리터에는 60 kg/m³의 밀도를 가지고 있는 rock-wool이 사용되고 있다. 흡음재의 밀도를 증가하면 소음저감이 성능을 높일 수 있는 가능성에 대한 실험을 실시하였다. Fig. 8은 샘플 #1에 대하여 흡음재의

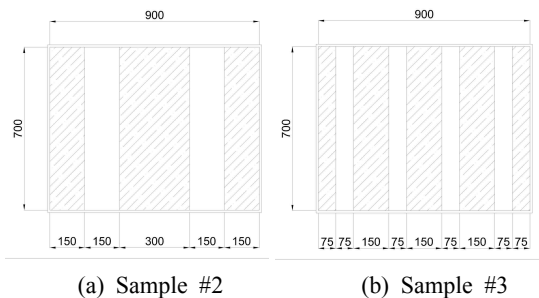


Fig. 6 Dimension of the sample silencers with 2 and 4 air ways (unit: mm)

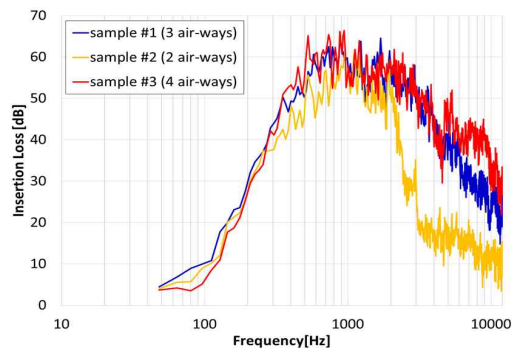


Fig. 7 The effect of splitter size on insertion loss

밀도를 증가하여 측정된 삽입손실을 보여 주고 있는데, 60 kg/m^3 이상에서 흡음재의 밀도를 증가하여도 삽입손실에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 100 kg/m^3 의 흡음재를 사용한 소음기는 상대적으로 500 Hz 부근에서 다소 낮고, 2 kHz 부근에서는 다소 높은 삽입손실이 측정되었다. 하지만 흡음재 밀도의 증가에 비하여 소음저감 성능의 변화는 미미하다. 옥타브밴드에서도 최고 3 dB 정도의 개선을 보이고 있다. 따라서 흡음재의 밀도에 있어서 일정한 밀도 이상으로 높이는 것은 소음저감 성능에 미치는 영향은 미미하다. 반면에 밀도를 증가하면 가격과 중량이 상승하는 문제가 발생하기 때문에 적절한 밀도의 흡음재를 선택해야 한다.

(3) 천공판의 천공률

서론에서 설명한 바와 같이 흡음재가 외부로 방출되는 것과 외부로부터 손상을 입는 것을 방지하기 위하여 일반적으로 천공판을 사용한다. 천공판의 일차적인 목적은 흡음재를 보호하는 것이지만 천공률에 따라서 소음기의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 천공률이 30% 이상이면 소음기의 성능에 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 샘플 #1의 기본에는 35% 의 천공률을 가지고 있는 천공판이 사용되고 있는데, 이 천공률의 변화가 소음기의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 서로 다른 천공률을 가지고 있는 소음기에 대한 삽입손실을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 천공률을 35% 에서 45% 로 증가하더라도 모든 주파수 영역에서 거의 동일한 삽입손실이 측정되었다. 옥타브밴드

에서도 차이가 1.1 dB 이하로 나타나서 예상한 바와 같이 천공률의 증가는 소음저감 성능에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 반대로 천공률을 35% 에서 22% 로 감소하여 측정된 결과 고주파수에서 삽입손실이 낮아지는 것을 확인하였다. 옥타브밴드 기준으로 4 kHz 와 8 kHz 에서 각각 6.9 dB 와 4.4 dB 가 감소하여 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 천공률을 높이는 것은 삽입손실에 영향을 미치지 못하지만 낮추면 특히 고주파수에서 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

(4) 미디어의 존재

천공판과 더불어 부직포와 같은 미디어가 흡음재를 싸고 있으며 따라서 천공판과 흡음재 사이에 미디어가 존재하게 된다. 미디어는 흡음재를 보호하는 동시에 소음기의 소음저감 성능에 영향을 미칠 가능성이 있기 때문에 미디어의 존재와 제거 상태에서 삽입손실을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 10에 제시하였다.

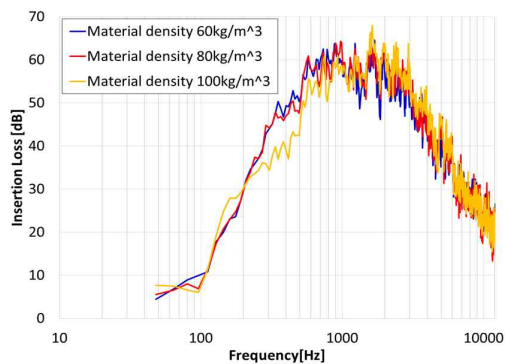


Fig. 8 The effect of absorbing material density on insertion loss

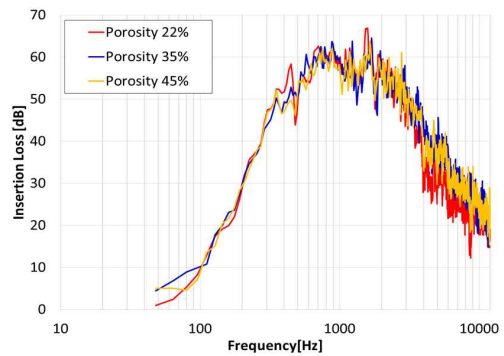


Fig. 9 The effect of plate porosity on insertion loss

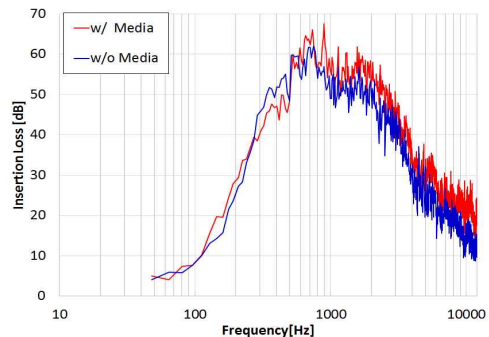


Fig. 10 The effect of media on insertion loss

미디어가 존재할 때 1 kHz이상의 주파수 영역에서 더 높은 삽입손실을 보여 주고 있다. 미디어가 제거된 상태에서는 흡음재가 천공을 직접 접촉하고 있기 때문에 천공의 임피던스를 변화시키고 결과적으로 소음저감 성능을 저하시키는 것으로 보인다. 이러한 결과는 흡음재가 천공과 직접 접촉하면 성능이 저하된다는 설명⁽¹⁰⁾과 같은 경향을 보이고 있다. 따라서 흡음재와 천공 사이에 미디어를 삽입하는 것은 흡음재의 보호뿐만 아니라 소음저감 성능에도 긍정적인 영향을 미친다고 할 수 있다.

4. 결 론

가스터빈 엔진의 흡기시스템에서 발생하는 소음을 저감하기 위한 대형 스플리터 소음기에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 우선 ISO 7235를 기초로 대형 스플리터 소음기의 삽입손실을 측정할 수 있는 장비를 제작하였다. 단면이 900×700 mm이고 길이가 2.5 m인 소음기의 삽입손실을 측정하기 위하여 전체 15 m 길이가 필요하였다. 모달필터의 설치로 인하여 스피커에서 전달되는 고차모드는 감소할 수 있지만, 측정한계를 낮추는 문제가 발생한다. 소음기 성능이 높은 경우에는 장비의 측정한계를 넘을 수 있다. 이 때 옥타브밴드보다는 주파수 영역에서 해석할 필요가 있다. 특히 한 옥타브밴드에서 측정한계보다 높은 주파수영역이 부분적으로 존재할 경우에 주의하여야 한다.

스플리터형 소음기의 설계요소가 성능에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 먼저 스플리터의 간격이 좁아지면 특히 고주파수에서 높은 삽입손실을 나타내고 있지만 저주파수에서는 그 영향이 상대적으로 낮아진다. 다음으로 흡음재의 밀도를 어느 정도 이상으로 높인다고 하더라도 소음기의 성능에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며 오히려 불필요한 흡음재의 추가적인 사용으로 인하여 가격과 무게가 늘어나는 부정적인 효과가 나타난다. 천공과 미디어는 일반적으로 흡음재를 보호하기 위해서 사용되고 있지만, 소음기의 성능에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 천공률이 일정한 값 이상이면 영향을 미치지 않지만, 천공률이 낮아지면 고주파수에서 삽입손실을 낮추는 결과를 초래한다. 마지막으로 미디어는 흡음재와 천공판의 사

이에 존재하여 천공의 임피던스에 영향을 미치는 것으로 보인다. 미디어가 제거된 상태와 비교하여 미디어의 존재로 인하여 고주파수에서 소음저감 성능을 높일 수 있다.

후 기

이 연구는 민·군 겸용 기술개발사업(해상용 가스터빈 흡기장치 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호 : 13-DU-MC-07).

References

- (1) Kim, C. Y., Yun, D. J., Kim, K. W. and Kim, H. J., 2010, The Research for Performance Improvement of Splitter Type Sound Attenuator, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 642~643.
- (2) Jeon, S. H., Hong, C. S. and Jeong, W. B., 2008, Acoustic Performance Analysis of a Splitter Silencer, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 332~333.
- (3) Kirby, R., Herries, D. and Amott, K., 2009, Validating Insertion Loss Predictions for HAVC Silencers, 16th International Congress on Sound and Vibration, pp. 1031~1038.
- (4) Kim, B. K., Kim, S. R., Kim, H. S. and Shin, M. C., 2008, Performance Test and Evaluation of Ship Exhaust Muffler, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 12, pp. 1237~1242.
- (5) Baek, S. H., Lee, K. H., Gwon, D. H. and Lee, I. J., 2014, Design and Measurement of Dissipative Silencers for Noise Reduction of Large Maritime Gas Turbine Engines, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 367~371.
- (6) Kirby, R., Amott, K., Williams, P. T. and Duan, W., 2014, On the Acoustic Performance of Rectangular Splitter Silencers in the Presence of Mean Flow, Journal of Sound and Vibration, Vol. 333, No. 24, pp. 6295~6311.
- (7) Kirby, R., 2005, The Influence of Baffle Fairings on the Acoustic Performance of Rectangular Splitter Silencers, Journal of the Acoustical Society of America,

Vol. 118, No. 4, pp. 2302~2312.

(8) Lee, J. H., Lee, B. Y., Nam, K. H., Kim, B. Y. and Kim, W. J., 2006, A Design Improvement of the Vent Silencer of the Industrial Plants Using Acoustic Analysis, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 122~128.

(9) ISO 7235, 2003, Acoustics- Laboratory Measurement Procedures for Ducted Silencers and Air-terminal Units -Insertions Loss, Flow Noise and Total Pressure Loss.

(10) Ver, I. L. and Beranek, L. L., 2006, *Noise and Vibration Control Engineering*, John Wiley & Sons, Inc.



Iljae Lee received his Ph.D. from the Department of Mechanical Engineering at Ohio State University. He is currently an associate professor at Chonbuk National University. His research interests are in automotive NVH.



Sunghyun Baek received his M.S. degree at the Department of Mechanical Engineering at Chonbuk National University. He is currently pursuing his Ph.D. degree. His research area is noise control.